



EESTI MAAÜLIKOOL

Metsandus- ja maaehitusinstituut

Metsakasvatuse ja metsaökoloogia õppetool

Kadi-Ly Pindma

**PEENJUURTE BIOMASS JA PRODUKTSIOON
VILJAKATES ARUKAASIKUTES**

**FINE ROOT BIOMASS AND PRODUCTION IN
PRODUCTIVE SILVER BIRCH STANDS**

Magistritöö

Metsamajanduse õppekava

Juhendajad: professor Veiko Uri, *PhD*

teadur Mats Varik, *PhD*

Tartu 2018

Eesti Maaülikool		Magistritöö lühikokkuvõte	
Kreutzwaldi 1, Tartu 51014			
Autor: Kadi-Ly Pindma		Õppekava: Metsamajandus	
Pealkiri: Peenjuurte biomass ja produktsioon viljakates arukaasikutes			
Lehekülgi: 35	Jooniseid: 1	Tabeleid: 9	Lisasid: 3
Õppetool: Metsakasvatus ja metsaökoloogia			
CERCS teaduseriala: Metsakasvatus, metsandus, metsandustehnoloogia (B430)			
Juhendajad: Veiko Uri, <i>PhD</i> ; Mats Varik, <i>PhD</i>			
Kaitsmiskoht ja -aasta: Tartu, 2018			
<p>Metsad on globaalse süsiniku (C) ringe oluline osa, olles läbi C sidumise üheks kliimamuutuste leevendajateks. Süsinik talletatakse metsades nii maa-pealsesse kui ka maa-alusesse biomassi. Kuna erinevate uuringute kohaselt võib mulda olla seotud umbes 75% kogu maismaa süsinikust, siis on väga oluline selgitada puistute maa-aluste süsiniku varude ja voogude dünaamikat. Ka on töömahukuse ja metoodiliste probleemide tõttu metsade maa-aluse biomassi uuringuid väga vähe, mis näitab selliste uuringute vajalikkust.</p> <p>Käesoleva magistritöö eesmärk on uurida arukaasikute peenjuurte biomassi ja produktsiooni ühe vegetatsiooniperioodi jooksul kahe Lõuna-Eesti arukaasiku näitel.</p> <p>Antud töös on kasutatud järjestikuse mullamonoliitide võtmise metoodikat (<i>sequential coring</i> ingl. k.), mis on üks sagedamini kasutatavaid meetodeid, hindamaks peenjuurte biomassi ja juurte produktsiooni aastast dünaamikat.</p> <p>Töö hüpoteesiks on eeldus, et harvendatud aladel puistu peenjuurte biomass esimestel raiejärgsetel aastatel väheneb.</p>			
Märksõnad: peenjuured, <i>Betula pendula</i> , maa-alune biomass, peenjuurte produktsioon			

Estonian University of Life Sciences Kreutzwaldi 1, Tartu 51014		Abstract of Master's Thesis	
Author: Kadi-Ly Pindma		Curriculum: Forest management	
Title: Fine root biomass and production in productive silver birch stands			
Pages: 35	Figures: 1	Tables: 9	Appendixes: 3
Chair:		Silviculture and Forest Ecology	
CERCS code:		Silviculture, forestry, forest technology (B430)	
Supervisors:		Veiko Uri, <i>PhD</i> ; Mats Varik, <i>PhD</i>	
Place and date:		Tartu, 2018	
<p>Forests play a crucial role in a global carbon (C) cycle for mitigating climate change effects via C accumulation. C is stored in forests both in above- and below-ground biomass. Therefore, it is essential to study the dynamics of the forest's carbon storages and fluxes. Moreover, regional level studies of above- and belowground tree biomass and production is important for understanding the global carbon cycle. With these estimates also the accuracy of greenhouse gas inventory reporting can be increased.</p> <p>While forest's aboveground biomass and it's distribution are quite well studied, the estimates of belowground biomass and its dynamics are still scarce. This shortcoming in knowledge is because of methodological difficulties associated with measuring underground woody biomass.</p> <p>The main aim of the present thesis is to study the fine roots biomass and -production in silver birch stand during one vegetation period in South-Estonia. One of the most common method for estimating the fine root dynamics, sequential coring method, is used to estimate fine root biomass and production. The hypothesis of the current thesis is the assumption that the fine root biomass decreases after the first few years after thinning.</p>			
Keywords: fine roots, <i>Betula pendula</i> , below-ground biomass, fine root production			

SISUKORD

SISSEJUHATUS.....	5
1. PUUDE JUURESTIK	8
1.1. Juure ehitus	8
1.2. Juurestiku tüübid.....	9
2. METOODIKA.....	10
2.1. Proovialade takseerikirjeldused	10
2.2. Peenjuurte biomassi ja produktsiooni hindamine	10
2.3. Statistiline andmetöötlus	12
3. TULEMUSED JA ARUTELU.....	13
3.1. Peenjuurte sügavusjaotus	13
3.2. Peenjuurte produktsioon	15
3.3. Peenjuurte biomass	18
3.3.1. Peenjuurte biomass puistu rinnaslõikepindala kohta	18
3.3.2. Peenjuurte biomassi aastane dünaamika.....	18
3.4. Peenjuurte keskmine biomass ja produktsioon ühe puu kohta.....	20
3.4.1. Keskmine peenjuurte biomass puu kohta	20
3.4.2. Keskmine peenjuurte produktsioon puu kohta	21
3.5. Süsiniku sisaldus peenjuurtes ja süsiniku voog mulda läbi juurevarise.....	22
KOKKUVÕTE.....	23
SUMMARY	24
KASUTATUD KIRJANDUS	25
LISAD	31
Lisa 1. Mullamonoliitide ehk proovide võtmine metsas. (Foto: Kadi-Ly Pindma)	32
Lisa 2. Peenjuurte sorteerimine laboratoorsetes tingimustes. (Foto: Hardo Becker).....	33
Lisa 3. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta	34

SISSEJUHATUS

2016. aastal ratifitseeriti Pariisi kliimakokkulepe, mis oli ajendatud kliimamuutustest ja suurenenud kasvuhoonegaaside (KHG) emissioonist (Kahn 2017) ning millele on alla kirjutanud ka Eesti. Kliimakokkulepe on globaalne tegevusplaan vältimaks ohtlike kliimamuutusi. Sellest lähtuvalt on 195 riiki asunud karmistama atmosfääri paisatavate kasvuhoonegaaside lubatud koguseid, et globaalsel tasandil saastenumbrid oluliselt väheneksid (Keskkonnaministeerium 2017).

Metsad on globaalse süsinikuringe väga oluline osa (Neumann *et al.* 2016), osaledes atmosfääri süsiniku sidujana (Bonan 2008). Boreaalsed ja hemiboreaalsed metsad on maismaaökosüsteemidest suurimad C sidujad ja neis asub suur osa maismaa bioloogilisest mitmekesisusest. Erinevate hinnangute kohaselt seovad metsad umbes kolmandiku atmosfääri paisatavast CO₂-st ning neisse on seotud rohkem kui kolm neljandikku kogu maismaa süsinikuvarust (Watson *et al.* 2000, Neumann *et al.* 2016). Seotud süsinik talletatakse metsade maa-pealsesse kui ka maa-alusesse biomassi, samuti mulda (McCormack *et al.* 2015). Hinnanguliselt on mullas 2/3 maismaal paiknevast süsinikust (Dixon *et al.* 1994) ning boreaalsetes metsades on maa-alusesse biomassi talletunud kaheksa korda rohkem süsinikku kui maa-pealsesse biomassi (Pypker ja Fredeen 2002). Lisaks seovad metsad osa inimtegevusest eraldunud süsihappegaasist, mis on tekkinud näiteks fossiilsete kütuste põletamisest ja maakasutuse muutumisest (Foley *et al.* 2005) ning metsade süsiniku sidumine nii biomassi kui ka mulda vähendab omakorda süsihappegaasi kogunemist atmosfääri ja seega võidakse sellega leevendada kliimamuutuste mõju avaldumist (Arnold 2004).

Süsinikuringe all võime mõista mitmeid erinevaid looduses toimuvaid protsesse, kus süsinik liigub organismide ja keskkonna vahel (Webster's New World College Dictionary 2016). Need toimuvad pidevalt esiteks tänu fotosünteesile läbi puude assimilatsiooniorganite, milleks on lehed ning okkad ja teisalt tänu mullahingamisele, mis toimub juurte, mulla ja atmosfääri vahel.

Mullas võib sisalduda umbes 75% kogu maismaa süsinikust (Schmidt *et al.* 2011). Uuringuid maa-aluse biomassi kohta on üldiselt vähe (Hertel ja Leuschner 2002) ja sellesisulised uuringud on aktuaalsed.

Mets avaldab olulist mõju mullale oma juurestiku kaudu ning juurestiku suuruse ja juurdumise sügavuse määrab ära mulla viljakus ja niiskusrajoitumus. Puud omastavad suurema osa toitainetest peente juurte ($d < 2\text{mm}$) kaudu ning raietegevus hoogustab süsinikuvoogusid metsas. Juurestiku levimise ulatus on ka liigipõhine tunnus (Roht 2011). Mida tootlikum on metsamaa ja kõrgem puistu boniteet, seda rohkem kasutab puistu süsihappegaasi ja eraldab rohkem õhku hapnikku.

Vastavalt enim kasutatud definitsioonile loetakse jämedate- ja peenjuurte vaheliseks piiriks 2 millimeetrit (Vogt *et al.* 1996, Makkonen ja Helmisaari 2001, Ostonen ja Lõhmus 2004, Finer *et al.* 2011, Terzaghi *et al.* 2016, Van Do *et al.* 2016). Lühiealisi ning pidevalt uuenevaid (Zhou *et al.* 2007) peenjuuri peetakse kogu juuresüsteemi aktiivsemaks osaks (Borja *et al.* 2008) ning sõltumata nende dimensioonidest joetakse nad veel erinevate ülesannetega kasvu-, juht- ning imijuurteks (Sepp 2017). Nende pideva uuendamise tõttu võib pärineda suur osa metsamulla orgaanilisest ainest just surnud ja kõdunevatest peenjuurtest.

Kuna peenjuurte uurimine on meetodiliselt keeruline, aeganõudev ja kulukas protsess (Hertel ja Leuschner 2002, Finer *et al.* 2007, Hirano *et al.* 2009), siis vaatamata asjaolule, et nad mängivad väga olulist rolli metsade süsinikubilansis, on nad kogu maailmas ühed vähem uuritud osa metsade süsinikuringes (Hertel ja Leuschner 2002).

Peenjuurte biomassi ja produktsiooni hindamiseks on olemas mitmeid erinevaid meetodikaid, näiteks juurevõrgud, juuresukad, minirisonid jne (Hirano *et al.* 2009, Lukac ja Godbold 2010, Osawa ja Aizawa 2012), kuid teadlased ei ole kõige täpsema ja tulemuslikuma meetodi osas siiani veel üksmeeleni jõudnud (Hertel ja Leuschner 2002, Yuan ja Chen 2012, Van Do *et al.* 2016). Seega tuleb arvestada asjaoluga, et erinevad meetodid võivad anda erinevaid tulemusi.

Käesolevas töös kasutati järjestikuste mullamonoliitide (*sequential coring* ingl. k.) meetodikat (Ostonen *et al.* 2005). See on üks levinumaid ja sagedamini kasutatavaid meetodeid peenjuurte biomassi ja produktsiooni hindamiseks metsaökosüsteemides (Vogt ja Persson 1991). Sel meetodil saadud peenjuurte biomassi ja nekromassi tulemused näitavad konkreetset hetkeolukorda puistus.

Käesoleva magistritöö eesmärk on hinnata harvendamise mõju peenjuurte biomassile ja produktsioonile, kahes viljakas kasvukohatüübis kasvavas arukaasikus ühe vegetatsiooniperioodi jooksul. Saadud tulemused võimaldavad hinnata ka peenjuurtesse seotud süsinikku ning läbi juurevarise mulda jõudvat süsiniku hulka.

Töö hüpoteesiks on eeldus, et harvendatud aladel puistu peenjuurte biomass esimestel raiejärgsetel aastatel väheneb.

Antud töö on osa RMK rahastatavast teadusprojektist „Raiete mõju metsade süsinikuringele“.

1. PUUDE JUURESTIK

Juur on taimeorgan, mis asub mullas ning tema ülesandeks on taime kinnitamine kasvupinnasesse, vee ja erinevate toitainete hankimine mullast ning nende transportimine taime maapealsetesse osadesse (Sun *et al.* 2015). Juurtel on erinevad ülesanded nagu näiteks tugi-, roni- ja õhujuured. Nad võivad isegi fotosünteesida ja hapnikku omastada (Roht 2011). Juured jaotatakse pea-, külg- ja lisajuurteks. Peajuur tekib seemne idanedes idujuurest ja kasvab otse alla. Peajuurest tekivad harud ehk külgujuured, mis omakorda harunevad korduvalt erinevates suundades. Juurekaelast kõrgemale võivad areneda ka erinevate ebasoodsate oludega kohanemiseks lisajuured. Need harilikult ei arene peajuurest, vaid tüvest (Roht 2011).

Peenjuured (alla 2 mm diameetriga juured) omavad olulist rolli mullaprotsessides ning on tähtsal kohal ökosüsteemis aset leidvates biokeemilistes protsessides (McCormack *et al.* 2015). Kuigi peenjuured moodustavad vaid väikese osa kogu puu biomassist (tavaliselt < 5%; Vogt *et al.* 1996, Brunner ja Godbold 2007) on peenjuured maa-aluse biomassi kõige dünaamilisem komponent (Sun *et al.* 2015), nad võivad aasta jooksul korduvalt uueneda (Rytter 2013) ning mõjutada puistu süsinikubilanssi olulisel määral.

1.1. Juure ehitus

Juure tipus asub 2-3 mm pikkune algkoerakkudest koosnev kasvukuhik, mida juurekübar kaitseb mehhaaniliste vigastuste eest. Kasvukuhikus toimub aktiivne rakkude paljunemine. Kasvukuhikule järgneb kasvuvööde, milles rakud intensiivselt kasvavad. Kasvuvöötlele järgnevad imav vööde, mis on kaetud üherakuliste juurekarvadega, mille abil hangib taim mullast vett ning selles lahustunud toitaineid. Järgmiseks on külgujuurte vööde ning juurekael (Roht 2011).

Juured on kaetud kattekoega, mille rakud korgistuvad vananedes ning seejärel korbastuvad. Juurte pikkuskasv võib toimuda kogu taime eluea jooksul, kuid üldiselt esinevad juurtel

kasvuperioodid. Juurte kasv on intensiivsem kevadel, hilissuvel ja sügisel, kui mulla niiskuse tase on kõrgem (Roht 2011). Siit ka põhjus, miks peenjuurte produktsiooni dünaamika selgitamiseks on käesolevas töös proove vegetatsiooniperioodi jooksul kogutud kolm korda.

Puitunud juurtel esineb ka jämeduskasv ning neis tekivad aastarõngad, mis on aga kitsamad ja ebaselgemad kui tüvepuidus (Roht 2011).

1.2. Juurestiku tüübid

Taime kõik juured kokku moodustavad juurestiku, mis peab tagama tugifunktsiooni ning varustama taime elutegevuseks ja talitluseks vajaliku vee ja toitainetega. Puittaimede juured harunevad enamasti monopodiaalselt. See tähendab, et peajuur kasvab tipust ja külgsuured tekivad tipust kõrgemal. Puude tugevat peajuurt nimetatakse sammasjuureks ja sellise juurega juurestikku sammasjuurestikuks. Puukoolides kärbitakse sageli taimede peajuurt (nt tammel), et lõpetada selle kasv ja soodustada külgsuure arenemist. Kui peajuur ei arene või on arenenud nõrgalt ja juurte põhiosa moodustavad külgsuured, on tegemist narmasjuurestikuga. Puude juurestikule iseloomulikud pikad ja harunemata juured on skelettjuured. Nende tipus asuvad lühikesed külgsuured, mida nimetatakse toite- ehk imijuurteks. Nende ülesandeks on imada mullast vett ja selles lahustunud toitaineid mida nad transpordivad edasi taime maapealsetesse osadesse. Skelettjuured on puudele toeks ja aitavad tõsta nende tormikindlust. Puittaimede juured täidavad erinevaid funktsioone vastavalt erinevatele mullatingimustele. Puid, mis kasvavad kuivadel ning toitainetevaestel muldadel iseloomustavad hästi arenenud sammasjuurestik, kus peajuur tungib sügavale maasse, et varustada taime sügavamalt ammutaud vee ja mineraalainetega. Peajuurest lähtuvalt tegutsevad edasi külgsuured, mis ankurdavad taime kindlalt mulda (Roht 2011).

Enamik puittaimi elab sümbioosis seentega, moodustades seenjuure ehk mükoriisa, mis aitab puudel paremini omastada toitaineid, eeskätt fosforit. Mõned puittaimedest kasvavad sümbioosis lämmastikku siduvate mügarbakteritega (hõbepuu, astelpaju, lepa ja porsa perekonnad). Mügarbakterid aitavad taimel omastada mullast õhulämmastikku ning rikastada seeläbi mulda lämmastikuga. Tänu sellisele sümbioosile on võimelised puittaimed kasvama lämmastikuvaestel aladel (Roht 2011).

2. METOODIKA

2.1. Proovialade takseerikirjeldused

Käesolevas uurimustöös hinnati peenjuurte biomassi ja produktsiooni ning arvutati nende käibekiirus ning eluiga kahes erineva vanusega looduslikus arukaasikus (Kambja ja Kiidjärve). Kambja katseala puhul on tegemist endisele põllumaale tekkinud jänsekapsa kasvukohatüübi arukaasikuga, Kiidjärve katseala puhul on tegemist aga metsamaal asuva jänsekapsa kasvukohatüübi arukaasikuga. Mõlemasse puistusesse rajati kaks proovitükki, millest ühel tehti 2015. aastal harvendusraie (H) ning teine jäeti kontrollalaks (K). Proovitükid mõlemas puistus takseeriti ülepinnaliselt 2017. aasta sügisel välitööde käigus (tabel 1).

Tabel 1. Kambja ja Kiidjärve proovialade takseerikirjeldused harvendatud- (H) ja kontrollalal (K) 2017. a. sügisel

Puistu	Vanus (a)	Puude arv		Diameeter		Kõrgus		Rinnaspindala	
		(tk ha ⁻¹)		(cm)		(m)		(m ² ha ⁻¹)	
		H	K	H	K	H	K	H	K
Kambja	21	1933	2500	12,1	11,1	18,7	17,2	21,3	24,2
Kiidjärve	29	667	1233	18,3	15,2	22,6	19,8	17,5	22,4

2.2. Peenjuurte biomassi ja produktsiooni hindamine

Silindrilise mullapuuriga ($\varnothing = 38$ mm) võeti igalt proovitükilt 2016. a oktoobris ja järgneva aasta mais, augustis ja oktoobris 15 mullamonoliiti. Mullamonoliit tõugati puuri seest välja ning asetati töötasapinnale, kus see jagati kümne sentimeetri tusedusteks sügavuskihtideks

noa ja joonlaua abil (lisa 1). Tekkinud 10 cm monoliidid asetati steriilsetesse säilituskarpidesse. Need markeeriti vastava prooviala nime, kuupäeva, proovi- ning kihi numbriga.

Proove säilitati kuni pesemiseni sügavkülmikus. Mullaproovide pesemise käigus eraldati muld ja kõik muud osakesed peale peenjuurte. Seejärel õppis töö autor erinevate puuliikide ja rohttaimede peenjuuri eristama ning algas nende sorteerimine (lisa 2) koos tööühma teiste liikmetega. Peenjuured ($\varnothing < 2$ mm) sorteeriti puuliikide kaupa, lisaks eraldati surnud peenjuured (nekromass) ning rohttaimede juured ning asetati paberist volditud ümbrikutesse. Vajadusel mõõdeti juure läbimõõtu nihikuga. Eraldatud peenjuure proovid asetati kuivama $+65\text{ }^{\circ}\text{C}$ kuivatuskappi püsiva massi saavutamiseni. Seejärel proovid kaaluti 0,001 g täpsusega, ja arvutati elusate ning surnud peenjuurte biomass erinevates sügavuskihtides hektari kohta.

Peenjuurte produktsiooni hindamiseks kasutati spetsiaalset peenjuurte dünaamika hindamiseks välja töötatud otsustusmaatriksit (Fairley ja Alexander 1985) (tabel 2). Peenjuurte käibekiirus ja eluiga arvutati biomassi ja produktsiooni põhjal.

Tabel 2. Peenjuurte produktsiooni hindamiseks kasutatav otsustusmaatriks Fairley ja Alexander'i (1985) järgi

		ELUS		
		suureneb	väheneb	
			$\Delta B_{\text{surnud}} > \Delta B_{\text{elus}}$	$\Delta B_{\text{elus}} > \Delta B_{\text{surnud}}$
SURNUD	suureneb	$P = \Delta B_{\text{elus}} + \Delta B_{\text{surnud}}$	$P = \Delta B_{\text{elus}} + \Delta B_{\text{surnud}}$	$P = 0$
	väheneb	$P = \Delta B_{\text{elus}}$	$P = 0$	

Elusate peenjuurte mass ehk biomass ja nekromass ehk surnud juurte mass saadi vastavalt kaalutud proovide summeerimisel kihtide kaupa. Produktsiooni arvutamisel kasutati otsustusmaatriksit, kus vastavalt tabeli suunistele arväärtused summeeriti ning tulemusena leiti konkreetse prooviala peenjuurte produktsioon hektari kohta.

Peenjuurte eluiga arvutati käibekiiruse pöördväärtusena (Varik *et al.* 2015). Süsiniku voogu mulda läbi juurevarise arvutati keskmise arukase peenjuurte süsiniku kontsentratsiooni (51,4%) põhjal (Varik *et al.* 2013).

Käibekiiruseks loetakse protsessi, kus peenjuured surevad ja nende asemele kasvavad uued aktiivsed peenjuured (Block *et al.* 2006). Surnud peenjuured lagunevad, mille tulemusel jõuab mulda orgaaniline süsinik. Kuna tegemist on eluea pöördväärtusega, siis mida lühem on peenjuurte eluiga, seda suurem on ka käibekiirus (Ostonen ja Lõhmus 2004). Käibekiirus arvutati aastase peenjuurte produktsioon ja biomassi suhtena (Gill ja Jackson 2000, McClaugherty *et al.* 1982).

2.3. Statistiline andmetöötlus

Tunnuste jaotuste vastavust normaaljaotusele kontrolliti *Lillefors'* ja *Shapiro-Wilki'*i testidega. Keskväärtuste statistilist erinevust kontrolliti normaaljaotuse korral T-testiga. Mittenormaaljaotuse korral analüüsiti andmeid *Mann-Whitney* testiga. Andmete töötlemine on teostatud R keskkonnas.

3. TULEMUSED JA ARUTELU

3.1. Peenjuurte sügavusjaotus

Kõigil uuritud proovitükkidel paiknes nelja proovivõtu keskmisena (kokku 720 proovi) (oktoober 2016 – oktoober 2017), üle 80% arukase peenjuurte biomassist ülemises 20 sentimeetrises mullakihis (tabel 3), olles suurim kontrollaladel, vastavalt 88% ja 90% Kambja ja Kiidjärve kaasikutes. Suur peenjuurte biomass ülemistes mullakihtides on heas kooskõlas varasema arukaasikutes läbi viidud uurimusega (Varik *et al.* 2013). Ka Aosaar *et al.* 2013 on endisel põllumaal kasvavas 17-aastases hall-lepikus leidnud, et mulla ülemises 20 cm kihis paiknes 74 kuni 84% kogu peenjuurte biomassist.

Tabel 3. Kase peenjuurte biomassi suhteline jaotus (%) sügavuskihtides harvendatud- (H) ja kontrollalal (K) uuritud arukaasikutes

Mullakiht	Kase peenjuurte biomassi suhtelise jaotuse näitaja, %			
	Kambja		Kiidjärve	
	H	K	H	K
0-10 cm	49,6	54,7	52,9	60,7
10-20 cm	30,8	33,0	27,6	28,9
20-30 cm	14,9	11,9	16,6	9,3
30-40 cm	4,7	0,4	2,9	1,1

Peenjuurte suurt osakaalu mulla pealmistes kihtides on märgitud paljudes töödes (Jackson *et al.* 1997, Finer *et al.* 2007, Zhou ja Shangguan 2007, Kalliokoski *et al.* 2008, 2009) ja seda põhjendatakse suurema toitainete kontsentratsiooniga nendes kihtides (Deans 1979, Vogt *et al.* 1981, Sainju ja Good 1993, Schmid ja Kazda 2002, Ostonen *et al.* 2005, Garkoti 2010).

Erinevad autorid väidavad, et mulla ülemsies 30 cm kihis paikneb enamus peenjuurte biomassist, olenemata puuliigist või kliimaatilistest tingimustest (Janssens *et al.* 2002, Persson *et al.* 1995). Alatalo (2015) sookaasikute aegreas läbiviidud uuringus selgus, et üle 90% sookase elusatest peenjuurtest paiknes just ülemises 30 cm tuseduses mullakihis.

Sarnane tulemus saadi ka antud töös, kus kahe arukaasiku peenjuurte biomass 0-30 cm mullakihis jäi 95 ja 99% vahele, olles suurim Kambja kontrollala kaasikus.

Tabel 4. Kase peenjuurte nekromassi jaotus sügavuskihti protsentides harvendatud- (H) ja kontrollalal (K) uuritud arukaasikutes

Mullakiht	Kase peenjuurte nekromassi suhteline jaotus, %			
	Kambja		Kiidjärve	
	H	K	H	K
0-10 cm	55,6	63,4	46,0	47,5
10-20 cm	31,4	23,4	23,6	29,6
20-30 cm	11,1	12,4	24,3	20,6
30-40 cm	1,9	0,8	6,2	2,3

Kambja katsealal oli surnud juurte osa mulla ülemises 20 cm kihis harvendatud ning kontrollalal sarnane, mõlemas asus selles kihis 87% kogu peenjuurte massist (tabel 4). Kiidjärve kaasikus oli ülemises 0-20 cm mullakihis kontrollalal 77% kõikidest surnud juurtest, kuid harvendatud alal 70%.

Tabel 5. Rohttaimede juurte ning risoomide biomassi jaotus sügavuskihti protsentides harvendatud- (H) ja kontrollalal (K) uuritud arukaasikutes

Mullakiht	Rohttaimejuurte biomassi suhteline jaotus, %			
	Kambja		Kiidjärve	
	H	K	H	K
0-10 cm	63,9	66,8	66,6	69,4
10-20 cm	20,6	24,9	20,6	19,7
20-30 cm	13,5	7,7	9,5	9,1
30-40 cm	2,0	0,6	3,3	1,8

Rohttaimede juurte biomassist paiknes Kambja kontrollalal 0-20 cm mullakihis 92% ja ülemises 0-30 cm mullakihis 99% (tabel 5). Kiidjärve kaasiku kontrollalal asus vastavates sügavuskihtides 89% ja 98% rohttaimede juurtest.

Peenjuurte biomasside keskvaartuste erinevust Kambja ja Kiidjärve kaasikute harvendatud ja kontrollalade vahel võrreldi mulla sügavuskihtide kaupa nelja erineval ajal võetud proovide põhjal (2016. a oktoober, 2017. a mai, 2017. a august ja 2017. a oktoober).

Võrreldes puistute peenjuurte biomassse harvendatud- ja kontrollalade vahel 2016. aasta oktoobri proovides, leiti keskväärtuste vahel statistiliselt usaldusväärne erinevus Kiidjärve kaasiku 10-20 cm sügavuses mullakihis (T-test, $p < 0,05$) ja Kambja puistu 20-30 cm ja 30-40 cm sügavustes mullakihtides (Mann-Whitney U, $p < 0,05$). 2017. aasta mai tulemuste võrdlemisel leiti usaldusväärne erinevus harvendatud- ja kontrollala vahel ainult Kiidjärve puistu 20-30 cm sügavuses mullakihis (Mann-Whitney U, $p < 0,05$). 2017. aasta augustis leiti usaldusväärne erinevus Kambja prooviaala 10-20 cm sügavuses mullakihis (T-test, $p < 0,05$) ja Kiidjärve puistu 30-40 cm sügavuses mullakihis (Mann-Whitney U, $p < 0,05$). Statistiliselt olulisi erinevusi puistute harvendatud ja kontrollalade vahel ei leitud 2017. aasta oktoobri proovidest (T-test ja Mann-Whitney U test, $p > 0,05$).

3.2. Peenjuurte produktsioon

Käesolevas töös osutus kase peenjuurte produktsioon kõige suuremaks Kiidjärve kaasiku kontrollalal, kus see oli $1,8 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Nooremas Kambja kaasikus oli harvendatud alal kase peenjuurte aastane produktsioon oli $1,5 \text{ t ha}^{-1}$. Nendel kahel ala oli ka käibekiirus (80%) kõige suurem (tabel 6). Mida suurem on käibekiirus, seda rohkem orgaanilist ainet ning süsinikku jõuab mulda.

Juurdumise sügavus näitab ühtlasi ka mullas leiduva süsiniku taset, kuna just juurte kaudu levib süsinik mulda kõige tõhusamal moel (Jobbágy ja Jackson 2000, Rothe *et al.* 2002, Vesterdal *et al.* 2002). Mullasüsiniku kontsentratsioon on suurem reeglina kõrgem ülemistes mullakihtides, kuhu süsinik jõuab nii juurevarise kui ka maapealse varise (varisenud lehtede, okste, viljade ja muu surnud biomassi) kaudu. Sügavamatesse mullakihtidesse maapealse varise mõju ei ulatu ja sinna jõuab orgaaniline süsinik peamiselt juurevarise lagunemisel ja ka leostumise kaudu.

Hõredamas puistus on puudel vähenenud konkurentsi tõttu paremad võimalused rohkem peenjuuri produtseerida ning seeläbi suudavad nad omastada rohkem toitaineid ja vett, mis omakorda tagab suurema produktsioonivõime sealhulgas kiirendab puude diameetri- ja kõrguse juurdekasvu (Aun 2017). Uuritud aladest oli puistu tihedus tunduvalt väiksem Kiidjärve kaasikus, kus peenjuurte produktsioon oli harvendatud alal $0,3 \text{ t ha}^{-1}$ võrra suurem

kontrollala produktsioonist. Kambja põllumaa kaasikus oli aga peenjuurte produktsioon kontrollalal harvendatud ala produktsioonist suurem ($0,9 \text{ t ha}^{-1}$).

Sepp (2017) oma uurimustöös leidis, et kaskede rinnaspindala suurenemine oli negatiivses korrelatsioonis ($R^2 = 0,73$) kaskede peenjuurte aastase produktsiooniga. Seega kase peenjuurte produktsioon ei sõltunud lõikepindalast.

Alatalo (2015) leidis oma uurimustöös, et sookaasikutes jänesekapsa-kõdusoo kasvukohatüübis rinnaspindala ja sookase peenjuurte produktsiooni vahel oluline seos puudus. Kuid näiteks hariliku männi puhul oli vastav positiivne seos peenjuurte produktsiooni ja rinnaspindala vahel olemas (Makkonen & Helmisaari 2001). Alatalo (2015) leidis ka, et sarnaselt rinnaspindalale ei olnud seost puistu tiheduse ja sookase peenjuurte produktsiooni vahel, sest noorimas, ja ühtlasi kõige tihedamas puistus oli peenjuurte produktsioon madalam, kui vanimas, kus puistu tihedus oli oluliselt väiksem.

Ostonen *et al.* (1999) järgi moodustub peenjuuri rohkem toitainevaesematel kasvukohtadel, kus puud kasutavad elutegevuseks ekstensiivset strateegiat ehk suurendavad peenjuurte biomassi, pikkust ja pindala (Löhmus *et al.* 2006), et efektiivsemalt omastada toitaineid ja vett. Sarnane tulemus saadi ka antud töös, kus Kiidjärve kontrollalal oli peenjuurte aastane produktsioon 0,6 tonni hektari kohta suurem kui Kambja kaasiku kontrollalal. Seda saab seletada asjaoluga, et Kambja kaasik on looduslikult tekkinud endisele viljakale põllumaale (näivleetunud muld) ning Kiidjärve kaasik endisele metsamaale (leetunud liivmuld).

Peenjuurte pidev uuenemine ja lagunemine aitab kaasa süsiniku ja toitainete tasakaalu kujunemisele ökosüsteemi tasandil (Gill ja Jackson 2000). Peenjuurte produktsioon ja suremus võib moodustada ligikaudu 30% globaalsest primaarproduktsioonist (Jackson *et al.* 1997) kuid mitmed keskkonnategurid ja haigused võivad seda looduslikku dünaamikat muuta (Atkinson 1991, Smucker 1993, Eissenstat *et al.* 2000).

Tabel 6. Kase peenjuurte biomass ja produktsioon harvendatud ja harvendamata katsealadel

	Kontrollala				Harvendatud ala			
	Biomass (t ha ⁻¹)	Produktsioon (t ha ⁻¹ a ⁻¹)	Eluiga (a)	Käibekiirus (a ⁻¹)	Biomass (t ha ⁻¹)	Produktsioon (t ha ⁻¹ a ⁻¹)	Eluiga (a)	Käibekiirus (a ⁻¹)
Kambja	2,1	1,2	1,8	0,6	1,9	1,5	1,2	0,8
Kiidjärve	2,1	1,8	1,2	0,8	2,5	0,9	2,9	0,3

Kui peale raiet on peenjuurte produktsioon suurenenud, siis on see indikaator suurenenud käibekiirusest, mis omakorda näitab, et puud reageerivad harvendamisele peenjuurte biomassi suurendamisega ja selles konkreetsetes puistus seotakse rohkem süsinikku.

Vee- ja toitaineterikkas keskkonnas kasvatavad puud endale peenikesed ja pikad juured, et suurendada toitainete omastamist (Brassard *et al.* 2009, Chen ja Brassard 2013), kuna vähemviljakates puistutes eelistavad puud kasvatada endale suurema läbimõõduga ning lühemaid juuri, et tagada pikemat eluiga ja väiksemat energiakadu käibekiiruselt (Yanai ja Eissenstat 2002). Juurte käibekiirust peetakse ebasoodsate tingimustega kohanemisel peamiseks protsessiks. Peenjuured kohanevad erinevate tingimustega ning nende talitus võib muutuda vastavalt vajadusele, et maksimeerida nende funktsionaalsust (Zadworny *et al.* 2015).

Eestis tehtud uuringu põhjal (Varik *et al.* 2015), peenjuurte produktsioon arukaasikutes tõusis märgatavalt puistu vanuse kasvades, olles 13-aastases Kambja kaasikus 0,89 tonni hektari kohta, 32-aastases Alatskivi kaasikus 1,44 tonni hektari kohta ja 45-aastases Erastvere kaasikus 1,31 tonni hektari kohta.

Lisaks on ka teistes avaldatud uurimustöodes leitud, et puistu vanuse tõustes kase peenjuurte produktsioon väheneb (Sepp 2017). Selles töös jäi kase peenjuurte produktsioon vahemikku 0,25 tonni hektari kohta kuni 0,80 tonni hektari kohta, osutudes suurimaks kõige nooremas, 23-aastases kase-kuuse segapuistus.

Käesoleva töö põhjal reageerisid uuritud kaasikud harvendamisele erinevalt: nooremas 21-aastases Kambja kaasikus produktsioon harvendatud alal oli suurem ning vanemas (29-aastases) Kiidjärve kaasikus harvendatud alal produktsioon vähenes võrreldes kontrollalaga.

3.3. Peenjuurte biomass

3.3.1. Peenjuurte biomass puistu rinnaslõikepindala kohta

Antud töös arvutati ka peenjuurte biomass rinnaslõikepindala kohta. Kolmel proovitükil (Kambja kontrollalal, Kambja harvendatud alal ja Kiidjärve kontrollalal) oli sarnaselt ühe ruutmeetri rinnaslõikepinna kohta umbes 0,09 tonni ehk 90 kilogrammi kase peenjuuri. Saadud suurim tulemus oli Kiidjärve harvendatud proovitükil, kus kase peenjuuri ühe ruutmeetri rinnaslõikepinna kohta oli umbes 0,14 tonni ehk 140 kg.

3.3.2. Peenjuurte biomassi aastane dünaamika

Peenjuurte biomassi ja produktsiooni mõjutavad oluliselt keskkonnatingimused, sealhulgas mulla lõimis, struktuur, õhustatus, niiskus, temperatuur, aga ka teiste taimede konkurents (Kramer ja Boyer 1995).

Järgnevalt on välja toodud kase peenjuurte aastane biomassi dünaamika (tabel 7), -kase peenjuurte aastane nekromassi dünaamika (tabel 8) ning rohttaimede aastane biomassi dünaamika (tabel 9).

Tabel 7. Kase peenjuurte aastane biomassi dünaamika (t ha^{-1}) uuritud proovitükkidel koos standardvigadega

Proovide võtmise aeg	Kase peenjuurte biomass (t ha^{-1})			
	Kambja		Kiidjärve	
	H	K	H	K
Oktoober 2016	$2,06 \pm 0,07$	$2,37 \pm 0,17$	$2,70 \pm 0,12$	$1,41 \pm 0,09$
Mai 2017	$1,33 \pm 0,06$	$1,66 \pm 0,07$	$2,06 \pm 0,1$	$1,50 \pm 0,07$
August 2017	$1,49 \pm 0,07$	$1,85 \pm 0,07$	$2,95 \pm 0,11$	$2,93 \pm 0,13$
Oktoober 2017	$2,58 \pm 0,09$	$2,73 \pm 0,10$	$2,41 \pm 0,09$	$2,67 \pm 0,11$

Tabel 8. Kase peenjuurte aastane nekromassi dünaamika ($t\ ha^{-1}$) uuritud proovitükkidel koos standardvigadega

Proovide võtmise aeg	Kase peenjuurte nekromass ($t\ ha^{-1}$)			
	Kambja		Kiidjärve	
	H	K	H	K
Oktoober 2016	$0,27 \pm 0,01$	$0,27 \pm 0,02$	$0,39 \pm 0,02$	$0,30 \pm 0,03$
Mai 2017	$0,42 \pm 0,03$	$0,41 \pm 0,04$	$0,60 \pm 0,04$	$0,45 \pm 0,02$
August 2017	$0,65 \pm 0,04$	$0,58 \pm 0,04$	$0,52 \pm 0,02$	$0,57 \pm 0,03$
Oktoober 2017	$0,39 \pm 0,02$	$0,53 \pm 0,02$	$0,55 \pm 0,03$	$0,68 \pm 0,03$

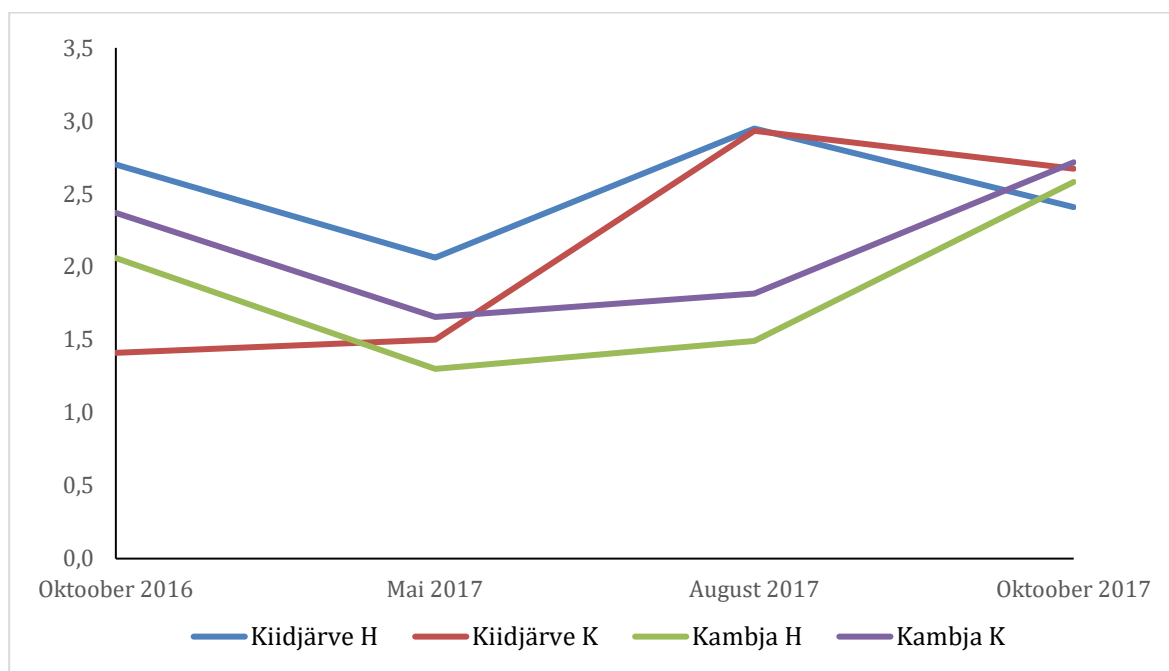
Tabel 9. Rohhtaime biomassi dünaamika ($t\ ha^{-1}$) uuritud proovitükkidel koos standardvigadega

Proovide võtmise aeg	Rohhtaime biomass ($t\ ha^{-1}$)			
	Kambja		Kiidjärve	
	H	K	H	K
Oktoober 2016	$0,08 \pm 0,01$	$0,03 \pm 0,01$	$0,88 \pm 0,05$	$1,53 \pm 0,11$
Mai 2017	$0,15 \pm 0,01$	$0,20 \pm 0,02$	$0,80 \pm 0,09$	$1,28 \pm 0,07$
August 2017	$0,39 \pm 0,04$	$0,29 \pm 0,02$	$0,97 \pm 0,06$	$1,70 \pm 0,07$
Oktoober 2017	$0,26 \pm 0,01$	$0,25 \pm 0,01$	$1,46 \pm 0,10$	$1,57 \pm 0,11$

Kase elusate peenjuurte aastane dünaamika (2016 oktoober – 2017 oktoober) uuritud puistute harvendatud- (H) ja kontrollalal (K) oli võrdlemisi erinev (tabel 7). Kiidjärve kaasiku kontrollala suurenes kase peenjuurte biomass perioodil okt. 2016. a.samal ajal kui teistel proovialaldel see samal ajal vähenes (joonis 1). Kiidjärve uurimisalal (nii harvendatud kui ka kontroll) jõudis kase peenjuurte biomass maksimumini suve lõpuks (august) ja Kambja alal alles sügiseks (oktoober). Sarnaste tulemusteni jõudis ka Varik *et al.* 2015, kus kase peenjuurte produktsiooni hooajaline dünaamika kolme aasta lõikes näitas sarnast kasvutrendi. Lisaks suurenes mainitud uurimuses kase peenjuurte produktsioon märkimisväärselt puistu vanuse kasvades.

Käesolevas töös käsitletud Kambja katsealal on pikema ajalooga: samas puistus on uuritud peenjuurte biomassi ja produktsiooni oma varasemates töödes ka M. Varik (Varik, *et al.* 2013; 2015). Käesoleva töö käigus andmete kogumise ajaks oli antud kaasik jõudnud kasvada 21 aastat ning kaks aastat enne proovide kogumist oli harvendatud osas tehtud esimene harvendusraie. Võrreldes kontrollala peenjuurte biomassi ja produktsiooni varasemate (13. a. puistu) andmetega on kase peenjuurte keskmine aastane produktsioon

suurenenud 0,3 tonni võrra hektari kohta, biomass suurenenud 0,8 tonni võrra hektari kohta ja eluiga kasvanud 0,3 aasta võrra kuid peenjuurte käibekiirus on jäänud samaks. Kuna tulemused on saadud kahe töö lõikes erinevate metoodikatega (varasemas töös kasutati produktsiooni hindamiseks juurte sissekasvusiilindreid), on oluline ära märkida võimalik metoodikatest tulenev mõõtmiste erinevus.



Joonis 1. Kase elusate peenjuurte biomassi dünaamika (2016 oktoober – 2017 oktoober) Kiidjärve ja Kambja harvendatud- (H) ja kontrollala (K) kaasikutes

3.4. Peenjuurte keskmine biomass ja produktsioon ühe puu kohta

3.4.1. Keskmine peenjuurte biomass puu kohta

Kiidjärve kaasikus oli peenjuurte biomass ühe puu kohta harvendatud alal 2,0 kg võrra suurem kui kontrollalal, olles harvendatud alal 3,74 ning kontrollalal 1,7 kg puu kohta.

Kambja katsealal varieerus peenjuurte biomass puu kohta vähem, olles 0,98 ja 0,84 kg puu kohta vastavalt harvendatud ja kontrollalal.

Sarapuu (2016) leidis oma uurimustöös, et kuuse peenjuurte biomassil ühe puu kohta kase-kuuse segametsades oli nõrka seos puu keskmise peenjuurte biomassi ja vanuse vahel, kus puistu vanuse kasvades suurenes biomass ühe puu kohta. Sama tendents ilmnes ka käesolevas töös. Siin võib põhjuseks võib olla tõsiasi, et vanematel puudel on rohkem peenjuurte biomassi kui noortel, kuid kuna puude tihedus langeb puistu vanuse kasvades, langeb ka peenjuurte biomass kogu puistus (Borja 2008). Sarapuu (2016) leidis, et kase peenjuurte biomass ühe puu kohta puistu tiheduse suurenedes väheneb. Hõredas 60-aastases puistus (tihedusega 267 puud/ ha) oli kaskede peenjuurte biomass suurim (8,5 kg/puu kohta) ning kõige tihedamas (1340 puud/ha) 20-aastases kase-kuuse segametsas kase peenjuurte biomass ühe puu kohta väikseim, vastavalt 1,1 kg/puu kohta.

Alatalo (2015) leidis oma uurimustöös, et peenjuurte biomass ühe puu kohta puistu vanuse suurenedes kasvas. Keskmise ühe puu peenjuurte biomass 15-aastases jänesekapsa-kõdusoo sookaasikus oli 0,5 kg/puu kohta ja 70-aastases jänesekapsa-kõdusoo sookaasikus 2,5 kg/puu kohta.

3.4.2. Keskmise peenjuurte produktsioon puu kohta

Kiidjärve kaasikus oli keskmine peenjuurte produktsioon ühe puu kohta harvendatud ja kontrollalal mõlemas võrdselt 1,46 kg. Kambja kaasikus peenjuurte produktsioon ühe puu kohta harvendatud alal ja kontrollalal oli erinev, vastavalt 0,78 ja 0,48 kg vahel.

Sepp (2017) leidis, et kase peenjuurte produktsioon puu kohta oli tugevas seoses ($R^2 = 0,72$) puistu tihedusega, kus puistu tiheduse kasvades peenjuurte produktsioon ühe puu kohta langes. Kase peenjuurte produktsioon ühe puu kohta oli 1,89 kg 23-aastases kase-kuuse segapuistus (puistu tihedus 423 puud/ha) ning 30- ja 53-aastastes puistutes vastavalt 0,36 ja 0,42 kg/puu kohta, kus puistu tihedused olid vastavalt 888 ja 595 puud hektari kohta (Sepp 2017).

Sookase peenjuurte produktsioon ühe puu kohta on tugevas seoses puistu vanuse suurenemisega. Noorimas, 15-aastases puistus, oli peenjuurte produktsioon 0,6 kg puu kohta aastas ja vanimas (70-a.) puistus, oli sookase peenjuurte aastane produktsioon 2,4 kg puu kohta (Alatalo 2015).

3.5. Süsiniku sisaldus peenjuurtes ja süsiniku voog mulda läbi juurevarise

Puidu kuivmassi süsiniku kontsentratsiooniks loetakse üldjuhul 50% (Lamton ja Savidge 2003, Terzaghi *et al.* 2016), kuid erinevad uurimused on näidanud, et puuliigiti ja fraktsiooniti võib süsiniku kontsentratsioon siiski olla väga erinev, kõikides 47-59% vahel (Lamton ja Savidge 2003, Uri *et al.* 2012). Varik *et al.* (2015) on leidnud, et süsiniku sisaldus arukase peenjuurtes on 51,39%.

Süsinikusisalduse alusel arvutati süsinikuvaru kase peenjuurtes, mis oli Kiidjärve kaasiku kontrollalal 0,9 t ha⁻¹ ja harvendatud alal 0,5 tonni hektari kohta. Kambja kaasikus oli see kontrollalal 0,6 t ha⁻¹ kohta ning harvendatud alal 0,8 tonni hektari kohta.

Kiidjärve kaasikus jõudis läbi juurevarise süsinikku mulda 3,2 t ha⁻¹, mida on oluliselt rohkem, kui Kambja kaasikus. Kuigi kase peenjuurte kaudu mulda jõudev süsiniku kogus oli mõlemas puistus võrdselt 1,4 t ha⁻¹, siis erinevus tuleb rohttaimede peenjuurtes, mis oli Kiidjärvel 4,0 t ha⁻¹ kuid Kambjas vaid 0,8 t ha⁻¹.

Peenjuurte eluiga on võimalik hinnata mitmete meetodite (nii otseste kui ka kaudsete) abil ja erinevad tulemused annavad peenjuurte vanuseks mõnest nädalast kuni 8 aastani (Ostonen ja Lõhmus 2004). Antud töös jäi kase peenjuurte eluiga 1,2 kuni 2,9 aasta vahele, mis teeb keskmiselt peenjuurte elueaks 648 päeva. Saadud tulemus on väga lähedane varasemale jänesekapsa kaasikutes läbi viidud töös saadule (741 päeva) (Varik *et al.* 2015).

Kiidjärve kaasikus oli harvendatud ja kontrollala käibekiiruste vahe 0,5 ehk kontrollalal vahetusid peenjuured poole kiirema aja jooksul. Kambja kaasikus oli käibekiiruste vahe 0,3 ehk harvendatud puistus vahetusid peenjuured 30% kiiremini kui harvendamata puistus.

KOKKUVÕTE

Käesoleva magistritöö eesmärgiks oli uurida arukaasikute peenjuurte biomassi dünaamikat ja –produktiooni ühe vegetatsiooniperioodi jooksul kahe Lõuna-Eesti arukaasiku näitel. Samuti hinnata harvendamise mõju peenjuurte biomassile, produktioonile ja vertikaalsele allokatsioonile mullas. Töö põhineb kahel uurimisalal: Kiidjärve 29-aastane metsamaal kasvavast kaasik ja Kambja 21-aastane looduslikult põllumaale tekkinud kaasik. Mõlemal katsealal oli kaks proovitükki: üks kontrollala ning teisel oli teostatud harvendusraie.

Käesolevas töös leiti:

1. Kõikidel uuritud aladel asus üle 80% arukase peenjuurte biomassist mulla ülemises 20cm kihis. Mõlema uuritud puistu (Kambja ja Kiidjärve) kontrollaladel aga vastavalt 88% ja 90%.
2. Rohhtaime juurte biomassist paiknes enamik (92-99%) 0-30 cm sügavuskihis.
3. Kambja katsealal ei erinenud peenjuurte nekromassi vertikaalne allokatsioon kontrollala ja harvendatud ala vahel; mõlemas variandis paiknes surnud juurtest 87% ülemises 0-20 cm mullakihis. Vanemas puistus (Kiidjärve ala) oli harvendatud osal 70% surnud juurtest samas mullakihis ja kontrollalal 77%.
4. Kase peenjuurte produktioon oli uuritud aladest suurim ($1,8 \text{ t ha}^{-1}$) 29-aastase Kiidjärve kaasiku kontrollalal.
5. Kõige suurem oli peenjuurte käibekiirus (80%) Kiidjärve kontrollala kaasikus.
6. Uuritud katsealade ja katsevariantide keskmisena jäi kase peenjuurte eluiga 1,2 kuni 2,9 aasta vahele, suurim oli see Kiidjärve harvendatud alal.
7. Keskmise peenjuurte biomass ühe puu kohta oli suurim Kiidjärve kaasikus (ületades kontrollala 2,0 kg võrra).
8. Keskmise peenjuurte biomass puistu rinnaslõikepinadala kohta oli suurim Kiidjärve harvendatud proovitükil (140 kg m^2). Ülejäänud uuritud proovitükkidel oli see 90 kg m^2 .
9. Kiidjärve kaasikus jõudis aastas mulda peejuurtega $3,2 \text{ t ha}^{-1}$ rohkem süsinikku kui Kambja kaasikus, mis oli põhjustatud suuremast rohhtaime peenjuurte biomassist.
10. Harvendusraie ei suurendanud peenjuurte biomassi puistu tasandil kahe aasta möödudes, ega mõjutanud ka peenjuurte sügavusjaotust.

SUMMARY

The purpose of this master thesis was to study the silver birch fine roots biomass dynamics and production during one growing season based off of two South-Estonian silver birch forests. Samples were taken from a 29-year-old silver birch forest growing on a forest area in Kiidjärve and from a 21-year-old silver birch forest growing on previous agricultural land in Kambja. Both study areas had two sample plots: one for control and one that had been thinned.

It was found that:

1. Over 80% of a silver birch tree's fine root biomass was located within the 20cm topsoil layer, 88% for the Kambja control area and 90% for Kiidjärve.
2. 92 to 99% of the herbal fine root biomass was located at a depth of 0-30 cm.
3. There was no difference between the necromass allocation of the control area and the thinned area in Kambja. In both areas 87% of the necromass of fine roots were located on the top soil layer. In Kiidjärve the thinned area's the respective percentage was 70% and the control area's was 77%.
4. Within this thesis the largest fine root production (1.8 t ha^{-1}) was in the control area of the 29-year-old Kiidjärve forest.
5. The largest fine roots turnover rate was 80% and was in the control area of Kiidjärve stand.
6. The average longevity of fine roots within the forest areas of this study was 1.2 to 2.9 years, longest being in the control area of Kiidjärve.
7. The average fine root biomass of one tree was the largest in the thinned area of Kiidjärve, surpassing the control area by 2.0 kg.
8. The average surface area of fine root biomass of the stand was largest within the Kiidjärve, 140 kg m^2 . The value of the other area studied was 90 kg m^2 .
9. Within the span of a year there was 3.2 t ha^{-1} more Carbon in the dirt in Kiidjärve than in Kambja, which was caused by a higher herbal biomass.
10. Thinning did not increase the fine root biomass on a stand level after two years or affect the soil distribution of biomass.

KASUTATUD KIRJANDUS

1. **Alatalo, T.** (2015). Peenjuurte biomass ja produktsioon sookaasikute (*Betula pubescens* Ehrh.) aegreas jänesekapsa-kõdusoo kasvukohatüübis. (Magistritöö). Eesti maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 32 lk.
2. **Alberdi, I., Astrup, R., Mohren, F., Hasenauer, H.** (2016) Comparison of carbon
3. **Aosaar, J., Varik, M., Lõhmus, K., Ostonen, I., Becker, H., Uri, V.** (2013). Long-term study of above- and below-ground biomass production in relation to nitrogen and carbon accumulation dynamics in a grey alder (*Alnus incana* (L.) Moench) plantation on former agricultural land. – European Journal of Forest Research. 132 (5-6), 737-749.
4. **Arnold, K.,** (2004). Forests and greenhouse gases: fluxes of CO₂, CH₄ and N₂O from drained forests on organic soils. – Linköping: 47 lk.
5. **Atkinson D.** (1991). Plant root growth an ecological perspective. Blackwell Science Publication, Oxford.
6. **Aun, K.** (2017). Harvendamise mõju noorte arukaasikute arengule. (Magistritöö). Eesti maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 36 lk.
7. **Block, R.M.A., Rees, K.C.J., and Knight, J.D.,** (2006). A review of fine root dynamics in *Populus* plantations. Agrofor. Sys. 67, 73-84.
8. **Bonan, G. B.** (2008) Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate change, and forestry. Cambridge: Cambridge university Press. 375 lk.
9. **Børja I, De Wit HA, Steffenrem A, Majdi H** (2008). Stand age and fine root biomass, distribution and morphology in a Norway spruce chronosequence in southeast Norway. Tree Physiol 28:773– 784
10. **Brassard BW, Chen HYH, Bergeron Y.** (2009). Influence of environmental variability on root dynamics in northern forests. Critical Reviewer in Plant Science 28:179–197.
11. **Brunner, I., Godbold, D.L.,** (2007). Tree roots in a changing world. J. Forest Res. 12 (2), 78–82.

12. **Chen HYH, Brassard BW.** (2013). Intrinsic and extrinsic controls of fine root life span. *Critical Reviewer of Plant Science* 32: 151–161.
13. **Deans, J.D.,** (1979). Fluctuations of the soil environment and fine root growth in a young Sitka spruce plantation. *Plant Soil* 52, 195–208.
14. **Dixon, R.K.,** Brown, S., Houghton, R.A., Solomon, A.M., Trexler, M.C., Wisniewski, J. (1994). Carbon pools and flux of global forest ecosystems. – *Science*. 263, 18-190.
15. **Eissenstat DM, Wells CE, Yani RD, Whitbeck JL.** (2000). Building roots in a changing environment: implications for root longevity. *New Phytologist* 147: 33–42.
16. **Fairley R., and Alexander J.** (1985). Methods of calculating fine root production in forests. In *Ecological interactions in soil*. Ed. A H Fitter. Special Publication of the British Ecological Society NO 4, 37–42.
17. **Finer, L, Helmisaari, H.-S., Lõhmus, K., Majdi, H., Brunner, L., Borja, I., Eldhuset, T., Goldbold D., Grebenc, T., Knopka, B., Kraigher, H., Möttönen, M.-R., Ohashi, M., Oleksyn, J., Ostonen, I., Uri, V., Vanguelova, E.** (2007). Variation on fine root biomass of three European tree species: Beech (*Fagus sylvatica* L.), Norway spruce (*Picea abies* L. Karst), and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). –*Plant Biosystems*, 141, 1-12.
18. **Finer, L, Helmisaari, H.-S., Lõhmus, K., Majdi, H., Brunner, L., Borja, I., Eldhuset, T., Goldbold D., Grebenc, T., Knopka, B., Kraigher, H., Möttönen, M.-R., Ohashi, M., Oleksyn, J., Ostonen, I., Uri, V., Vanguelova, E.** (2007). Variation on fine root biomass of three European tree species: Beech (*Fagus sylvatica* L.), Norway spruce (*Picea abies* L. Karst), and Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). – *Plant Biosystems*, 141, 1-12.
19. **Finer, L., Ohashi, M., Noguchi, K., Hirano, Y.** (2011). Fine root production on forest ecosystems in relation to stand and environmental characteristics. – *Forest Ecology and Management*, 262, 2008-2023.
20. **Foley, J. A, De Fries, R., Asner, G. P.** (2005). Global consequences of land use. – *Science*, 309, 570-574.
Gill RA, Jackson RB. (2000). Global patterns of root turnover for terrestrial ecosystems. *New Phytologist* 147: 13–31.
21. **Garkoti, S.C.,** (2010). Fine root dynamics in three central Himalayan high elevation forests ranging from closed canopies to open-canopied treeline vegetation. *J. Forest Res.* 16, 136–143.

22. **Hertel, D., Leuschner, C.** (2002). A Comparison of four different fine root production estimates with ecosystem carbon balance data in Fagus– Quercus mixed forest. – Plant and Soil, 239, 237-251.
23. **Hirano, Y., Noguchi, K., Ohasi, M., Hishi, T., Makita, N., Fujii, S., Finer, L.** (2009). A new method for placing and lifting root meshes for estimating fine root production in forest ecosystems. – Plant Root, 3, 26-31.
24. **Jackson, R. B., Mooney, H. A., Schulze, E. D.** (1997). A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. – Proceedings of the National Academy of Sciences USA. 94, 7362-7366.
25. **Janssens, I.A., Sampson, D.A., Curiel-Yuste, J., Carrara, A., Ceulemans, R.** (2002). The carbon cost of fine root turnover in a Scots pine forest. – Forest Ecology and Management. 168, 231-240.
26. **Jobbágy, E.G., Jackson, R.B.,** (2000). The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. Ecological Applications 10, 423–436.
27. **Kahn, B.,** (2017). We Just Breached the 410 Parts Per Million Threshold. Scientific American.
28. **Kalliokoski, T., Nygren, P., Sievänen, R.,** (2008). Coarse root architecture of three boreal tree species growing in mixed stands. Silva Fenn. 42 (2), 189–210.
29. **Kalliokoski, T., Pennanen, T., Nygren, P., Sievänen, R., Helmisaari, H.-S.,** (2009). Belowground interspecific competition in mixed boreal forests: fine root and ectomycorrhiza characteristics along stand developmental stage and soil fertility gradients. Plant Soil 330 (1–2), 73–89.
30. **Kramer, J. P., Boyer, S. J.** (1995). Water Relations of Plants and Soils. San Diego, New York: Academic Press.
31. **Laas, E., Uri, V., Valgepea, M.,** (2011). Õpik kõrgkoolidele „Metsamajanduse alused“. Roht, U. „Puittaimede ehitus ja talitlus“. Tartu. 862, 23-24.
32. **Lukac, M., Godbold, D.-L.** (2010). Fine root biomass and turnover in southern taiga estimated by root inclusion nets. – Plant Soil, 331, 505-513.
33. **Lõhmus, E.,** (1984). Eesti metsakasvukohatüübid. Tallinn, 76 lk.
34. **Lõhmus, K., Truu, M., Truu, J., Ostonen, I., Kaar, E., Vares A et al.** (2006). Functional diversity of culturable bacterial communities in the rhizosphere in relation to fine root and soil parameters in alder stands on forest abandoned agricultural and oil shale areas. – Plant and Soil, 283 (1-2), 1-10.

35. **Makkonen, K., Helmisaari, H.-S.** (2001). Fine root biomass and production in Scots pine stands in relation to stand age. – *Tree Physiology*. 21, 193-198.
36. **McClaugherty, C.A., Aber, J.D., Melillo, J.M.,** (1982). The role of fine roots in the organic matter and nitrogen budgets of two forested ecosystems. *Ecology*. 635, 1481-90.
37. **Nadelhoffer KJ, Raich JW.** (1992). Fine root production estimates and belowground carbon allocation in forest ecosystems. *Ecology* 73:1139–1147.
38. **Neumann, M., Moreno, A., Mues, V., Härkönen, S., Mura, M., Bouriaud, O., Lang, Osawa, A., Aizawa, R.** (2012). A new approach to estimate production, mortality and decomposition of fine roots using litter-bag experiments and ordinary soil-core techniques. – *Plant Soil*, 355, 167-181.
39. **Ostonen, I., Krista, L., Katrin, P.** (2005). Fine root biomass, production and its proportion of NPP in a fertile middle-aged Norway spruce forest: Comparison of soil core and ingrowth core methods. *Forest Ecology and Management* 212; 264–277.
40. **Ostonen, I., Lõhmus, K.** (2004). Kui kaua elavad puude peened juured ehk demograafilise tasakaalu puude peente juurte populatsioonis. – *Schola Biotheoretica.*, 30, 109-116.
41. **Persson, H., Von Fricks, Y., Majdi, H., Nilsson, L.O.** (1995). Root distributsioon in a Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stand subjected to drought and ammoniumsulphate application. – *Plant and Soil*. 168-169, 161-165.
42. **Pypker, T.G., Fredeen, A.L.** (2002). The growing season carbon balance of a subboreal clearcut 5 years after harvesting using two independent approaches to measure ecosystem CO₂ flux. – *Canadian Journal of Forest Research*. 32, 852-862.
43. **Rothe, A., Kreutzer, K., Küchenhoff, H.,** (2002). Influence of tree species composition on soil and soil solution properties in two mixed spruce-beech stands with contrasting history in southern Germany. *Plant and Soil* 240, 47–56.
44. **Rytter, R.-M.,** (2013). The effect of limited availability of N or water on C allocation to fine roots and annual fine root turnover in *Alnus incana* and *Salix viminalis*. *Tree Physiol.* 33, 924-39.
45. **Sainju, U.M., Good, R.E.,** (1993). Vertical root distribution in relation to soil properties in New Jersey Pinelands forests. *Plant Soil* 150, 87–97.

46. **Sarapuu, S.** (2016). Peenjuurte biomass erineva vanusega kase (*Betula pendula*)- kuuse (*Picea abies*) segametsades. (Bakalaureusetöö). Eesti maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 25 lk.
47. **Schmid, I., Kazda, M.,** (2002). Root distribution of Norway spruce in monospecific and mixed stands on different soils. *Forest Ecol. Manage.* 159, 37–47.
48. **Schmidt, M.W.I.,** Torn, M.S., Abiven, S., Dittmar, T., Guggenberger, G., Janssens, I.A., Kleber, M., Kögel-Knabner, I., Lehmann, J., Manning, D.A.C., Nannipieri, P., Rasse, D.P., Weiner, S., Trumbore, S.E. (2011). Persistence of soil organic matter as an ecosystem property. – *Nature*. Vol. 478, lk. 49–56. *Science*, 309, 570-574.
49. **Sepp, L.** (2017). Peenjuurte produktsioon kase (*Betula pendula* Roth.)-kuuse (*Picea abies* (L.) Karst.) segapuistute aegreas. Bakalaureusetöö. Eesti Maaülikooli metsandus- ja maaehitusinstituut. Tartu. 26 lk.
50. **Smucker, AJM.** (1993). Soil environmental modifications of root dynamics and measurement. *Annual Review of Phytopathology* 31: 191–218.
51. **Sun, T., Dong, L., Mao, Z., Li, Y.** (2015). Fine root dynamics of trees and understorey vegetation in a chronosequence of *Betula platyphylla* stands. *Forest Ecology and Management*. 346, 1-9.
52. **Zadworny M, McCormack ML, Rawlik K, Jagodzinski AM.** (2015). Seasonal variation in chemistry, but not morphology, in roots of *Quercus robur* growing in different soil types. *Tree Physiology* 35: 644–652.
53. **Zhou, Z., Shangguan, Z.,** (2007). Vertical distribution of fine roots in relation to soil factors in *Pinus tabulaeformis* Carr. forest of the Loess Plateau of China. *Plant Soil* 291, 119–129.
54. **Terzaghi, M., Di Iorio, A., Montagnoli, A., Baesso, B., Scippa, G.-S., Chiatante, D.** (2016). Forest canopy reduction stimulates xylem production and lowers carbon concentration in fine roots of European beech. – *Forest Ecology and Management*, 379, 81-90.
55. **Van Do, T., Sato, T., Kozan, O.** (2016). A new approach for estimating fine root production in forests: a combination of ingrowth core and scanner. – *Trees*, 30, 545-554.
56. **Varik, M., Kukumägi, M., Aosaar, J., Becker H., Ostonen, I., Lõhmus, K., Uri, V.** (2015) Carbon budgets on fertile silver birch (*Betula pendula* Roth.) chronosequence stands. – *Ecological Engineering*. 77, 284-296.

- 57. Watson, R. T., Noble I. R., Bolin, B., Ravindranath, N. H., Verardo, D. J., Dokken D.** (2000). Land Use, Land-Use Change, and Forestry. A Special Report of the IPCC. Cambridge University Press.
- 58. Vesterdal, L., Ritter, E., Gundersen, P.,** (2002). Change in soil organic carbon following afforestation of former arable land. *Forest Ecology and Management* 169, 137–147.
- 59. Vogt, K.A., Grier, G.C., Grover, S.T., Sprugal, D.G., Vogt, D.J.** (1986). Overestimation of net root production: a real or imaginary problem? – *Ecology*. 67, 577-579.
- 60. Vogt, K.A., Persson, H.,** (1991). Measuring growth and development of roots. In *Techniques and approaches in forest tree ecophysiology*. Edited by J.P. Lassoie and T.M. Hinckley. CRC Press, Boca Raton, Fla. pp. 477-501.
- 61. Vogt, K.A., Vogt, D.J., Palmiotto, P.A., Boon, P., O’Hara, J., Asbjornsen, H.** (1996). Review of root dynamics in forest ecosystems grouped by climate, climatic forest type and species. – *Plant and Soil*. 187, 159-219.
- 62. Yanai RD, Eissenstat DM.** (2002). Coping with herbivores and pathogens: a model of optimal root turnover. *Functional Ecology* 16: 865–869.
- 63. Yuan, Z.-Y., Chen, Y.-H.** (2012). Indirect methods produce higher estimates of fine root production and turnover rates than direct methods. – *Plos One* 7, e48989.

LISAD



Lisa 1. Mullamonoliitide ehk proovide võtmine metsas (Foto: Kadi-Ly Pindma)



Lisa 2. Peenjuurte sorteerimine laboratoorsetes tingimustes (Foto: Hardo Becker)

Lisa 3. Lihtlitsents lõputöö salvestamiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks ning juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Mina, _____,
(*autori nimi*)

sünniaeg _____,

1. annan Eesti Maaülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) enda koostatud lõputöö

_____,
(*lõputöö pealkiri*)

mille juhendaja(d) on _____,
(*juhendaja(te) nimi*)

1.1. salvestamiseks säilitamise eesmärgil,

1.2. digiarhiivi DSpace lisamiseks ja

1.3. veebikeskkonnas üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

kuni autoriõiguse kehtivuse tähtaja lõppemiseni;

2. olen teadlik, et punktis 1 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile;

3. kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei rikuta teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse seadusest tulenevaid õigusi.

Lõputöö autor _____
(*allkiri*)

Tartu, _____
(*kuupäev*)

Juhendaja(te) kinnitus lõputöö kaitsmisele lubamise kohta

Luban lõputöö kaitsmisele.

(*juhendaja nimi ja allkiri*)

(*kuupäev*)

(*juhendaja nimi ja allkiri*)

(*kuupäev*)

